

Plasma accelerator arrangement

Patent Number: US6523338
 Publication date: 2003-02-25
 Inventor(s): SEIDEL HARALD (DE); WEGENER JUERGEN (DE); KORNFELD GUENTER (DE)
 Applicant(s): THALES ELECTRON DEVICES GMBH (DE)
 Requested Patent: DE19828704
 Application Number: US20000720208 20001222
 Priority Number(s): DE19981028704 19980626; WO1999DE01708 19990611
 IPC Classification: H05H1/54
 EC Classification: B64G1/40D; F03H1/00; H05H1/54
 Equivalents: EP1123642 (WO0001206), A1, JP2002519577T, RU2214074, WO0001206

Abstract

For a plasma accelerator arrangement in particular for use as an ion thruster in a spacecraft, a structure is proposed in connection with which an accelerated electron beam is admitted into an ionization chamber with fuel gas, and is guided through the ionization chamber in the form of a focused beam against an electric deceleration field, said electric deceleration field acting at the same time as an acceleration field for the fuel ions produced by ionization. The arrangement generates a focused beam of a largely neutral plasma with a high degree of efficiency. Configurations for electric and magnetic fields for guiding and focusing the beams are given by way of example

Data supplied from the esp@cenet database - I2

Description

CROSS REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS

[0002] Applicants claim priority under 35 U.S.C. [section]119 of GERMAN Application No. 198 28 704.6 filed on Jun. 26, 1998. Applicants also claim priority under 35 U.S.C. [section]120 of PCT/DE99/01708 filed on Jun. 11, 1999. The international application under PCT article 21 (2) was not published in English.

DESCRIPTION

[0003] The invention relates to a plasma accelerator arrangement. Plasma accelerators (ion thrusters, electric propulsion systems-EPS) are very important as thrusters in spacecraft both for satellites orbiting close to the earth and geo-stationary satellites, and for space missions outside of the earth orbit. The ratio of driving pulse to mass of the fuel, which is used as a measure of the degree of efficiency of the drive system is substantially more favorable for plasma accelerators than for conventional chemical drive system, with the result that the proportional weight of the fuel is reduced. Such a reduction is of particular importance for space applications. A noble gas with a high atomic weight, in particular xenon is frequently employed as the fuel.

[0004] In conjunction with grid ion thrusters, for example U.S. Pat. No. 4,838,021, a plasma is produced in an ionization chamber from neutral gas by high frequency or electron bombardment. The positively charged ions are accelerated in an applied electrical field in the direction of ejection toward a grid electrode. For the electrical neutralization, a current of free electrons has to be added to the accelerated ion current. The neutralized current of plasma exits from the drive system at high speed and accelerates the spacecraft in the opposite direction. Owing to the space charging effects, the density of the ion current is limited, and the drive systems of this type require large cross sections combined with only moderate reaction propulsion effects.

[0005] In conjunction with drive systems according to the Hall principle, for example EP 541,309 A1, a ring-shaped ionization chamber is penetrated by an electrical acceleration field parallel with the axis of the ring, and a radial magnetic field. From an external electron source, electrons are guided into the ionization chamber containing neutral xenon gas against the direction of ejection of the ions. In said ionization

BEST AVAILABLE COPY

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 198 28 704 A 1

51 Int. Cl.⁶:
H 05 H 1/54
F 03 H 1/00
B 64 G 1/40

21 Aktenzeichen: 198 28 704.6
22 Anmeldetag: 26. 6. 98
43 Offenlegungstag: 30. 12. 99

DE 198 28 704 A 1

71 Anmelder:
Thomson Tubes Electroniques GmbH, 89077 Ulm,
DE
74 Vertreter:
Weber, G., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 89073 Ulm

72 Erfinder:
Kornfeld, Günter, Dr., 89275 Elchingen, DE;
Wegener, Jürgen, Dr., 89081 Ulm, DE; Seidel,
Harald, Dr., 88483 Burgrieden, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

US 48 38 021
US 42 96 327
EP 05 41 309 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Plasmabeschleuniger-Anordnung

57 Für eine Plasmabeschleuniger-Anordnung, insbesondere zur Anwendung als Ionentriebwerk in einem Raumflugkörper, wird eine Struktur vorgeschlagen, bei welcher ein beschleunigter Elektronenstrahl in eine Ionisationskammer mit Treibstoffgas eingeleitet und als gebündelter Strahl durch die Ionisationskammer entgegen einem elektrischen Verzögerungsfeld, daß zugleich als Beschleunigungsfeld für die durch Ionisation erzeugten Treibstoffionen wirkt, geführt wird. Die Anordnung erzeugt einen gebündelten Strahl eines weitgehend neutralen Plasmas mit einem hohen Wirkungsgrad. Konfigurationen für elektrische und magnetische Felder zur Strahlführung und Strahlfokussierung sind beispielhaft angegeben.

DE 198 28 704 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Plasmabeschleuniger-Anordnung. Plasmabeschleuniger (ion thrusters, electric propulsion systems EPS) sind von erheblicher Bedeutung als Antriebe in Weltraumflugkörpern sowohl für erdnahe und geostationäre Satelliten als auch für Raummissionen außerhalb eines Erdborbits. Das Verhältnis von Antriebsimpuls zu eingesetzter Treibstoffmasse als ein Maß für den Wirkungsgrad des Antriebs ist für Plasmabeschleuniger wesentlich günstiger als für konventionelle chemische Antriebe, so daß sich eine für Weltraumanwendungen besonders wichtige Verringerung des Gewichtsanteils des Treibstoffs ergibt. Als Treibstoff wird häufig ein Edelgas mit hohem Atomgewicht, insbesondere Xenon eingesetzt.

Bei Gitter-Ionentriebwerken wird in einer Ionisationskammer aus neutralem Xenon-Gas durch Hochfrequenz oder Elektronenbeschuß ein Plasma erzeugt. Die positiv geladenen Ionen werden in einem angelegten elektrischen Feld in Richtung einer Gitterelektrode in Ausstoßrichtung beschleunigt. Dem beschleunigten Ionenstrom muß zur elektrischen Neutralisation ein Strom freier Elektronen zugefügt werden. Der neutralisierte Plasmastrom tritt mit hoher Geschwindigkeit aus dem Triebwerk aus und beschleunigt den Flugkörper in entgegengesetzter Richtung. Durch Raumladungseffekte ist die Ionenstromdichte beschränkt und die Triebwerke dieser Bauart benötigen große Querschnitte bei nur mäßigem Rückstoßimpuls.

Bei Ionentriebwerken nach dem Hallprinzip ist eine ringförmige Ionisationskammer von einem zur Ringachse parallelen elektrischen Beschleunigungsfeld und einem radialen Magnetfeld durchsetzt. Von einer externen Elektronenquelle werden entgegen der Ionenausstoßrichtung Elektronen in die neutrale Xenon-Gas enthaltende Ionisationskammer geleitet, wo sie aufgrund des Magnetfelds auf Spiralbahnen gezwungen werden und so die Laufstrecke innerhalb der Ionisationskammer gegenüber dem direkten Weg zur Anode vervielfacht und dadurch auch ionisierende Wechselwirkung mit dem Treibstoffgas gesteigert wird. Von der magnetischen Ablenkung sind auch Sekundärelektroden betroffen, die in dem elektrischen Feld beschleunigt werden. Die gegebene Feldkonfiguration vermeidet ferner weitgehend die Ausbildung von Raumladungszonen, welche eine Abschirmung des elektrischen Beschleunigungsfelds für die positiven Treibstoffionen bewirken könnten. Die Beschleunigung der positiven Ionen erfolgt daher in einem weitgehend neutralen Plasma. Eine solche Anordnung erlaubt deutlich höhere Stromdichten als eine Gitter-Ionentriebwerksanordnung, zeigt aber durch eine große Winkelaufweitung des ausgestossenen Ionenstroms einen nur mäßigen Wirkungsgrad.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Plasmabeschleuniger-Anordnung, insbesondere als Ionentriebwerk in Raumflugkörpern, mit verbessertem Wirkungsgrad anzugeben.

Die Erfindung ist im Patentanspruch 1 beschrieben. Die Unteransprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung.

Bei der erfindungsgemäßen Anordnung setzt der in die Ionisationskammer eingeleitete gebündelte Elektronenstrahl anfänglich die Ionisation des in der Ionisationskammer befindlichen und/oder in diese eingeleiteten neutralen Treibstoffgases in Gang. Die bei der Ionisation freigesetzten Sekundärelektronen werden in dem zur Beschleunigung der positiven Ionen vorgesehenen elektrischen Feld in Gegenrichtung beschleunigt und wirken selbst wieder ionisierend. Nach Initiierung des Ionisationsprozesses durch den Elektronenstrahl können die Sekundärelektronen den Hauptteil

der weiteren Ionisation übernehmen.

Ein weiterer wichtiger Effekt des eingeleiteten Elektronenstrahls ist die Begünstigung der Fokussierung eines im elektrischen Beschleunigungsfeld beschleunigten Ionenstrahls durch Kompensation der positiven Raumladung des Ionenstroms durch die negative Raumladung des Elektronenstrahls, so daß keine Abschirmung des beschleunigenden elektrischen Felds erfolgt. Das Beschleunigungsfeld für die positiven Ionen wirkt für die Elektronen des in gleicher Richtung wie der des beschleunigten Ionenstroms laufenden Elektronenstrahls verzögernd, so daß die Raumladungsdichte des Elektronenstrahls in Richtung der Längsachse der Ionisationskammer zunimmt, was vorteilhaft korrespondiert mit der insbesondere im Endabschnitt der Ionisationskammer angestrebten Bündelung des Ionenstrahls. Vorzugsweise sind mittlere Geschwindigkeit der Elektronen des Elektronenstrahls und Potentialgefälle des Beschleunigungsfelds für die Ionen, was einer Potentialsteigerung für die Elektronen entspricht, so aufeinander abgestimmt, daß am Ende der Beschleunigungsstrecke für die Ionen (bzw. Verzögerungsstrecke für die Elektronen des Elektronenstrahls) die mittleren Geschwindigkeiten von Elektronen des Elektronenstrahls und Ionen des beschleunigten Ionenstroms annähernd gleich sind, so daß ein annähernd neutrales Plasma am Ende der Beschleunigungsstrecke austritt. Die mittleren Geschwindigkeiten unterscheiden sich vorzugsweise um weniger als den Faktor 10.

Der Elektronenstrahl wirkt über die gesamte Länge der Ionisationskammer durch seine negative Raumladung auch als zentraler Attraktor für die positiven Ionen und unterstützt die Fokussierung der beschleunigten Ionen in einen gebündelten Elektronenstrom und kompensiert gleichzeitig die gegenseitige Abstoßung der Ionen. Einer Aufweitung des Elektronenstrahls kann durch ein Strahlführungs- und/oder Strahlfokussierungssystem aus magnetischen und/oder elektrischen Feldern entgegengewirkt werden. Vorteilhaft ist insbesondere ein magnetisches Strahlführungssystem mit im Strahlbereich zur Strahlrichtung und zur Längsachse der Ionisationskammer im wesentlichen parallelem Feldverlauf. Elektronen des Elektronenstrahls mit einer Bewegungskomponente senkrecht zur Längsachse werden durch das Magnetfeld auf eine Spiralbahn um die Strahlachse gezwungen. Magnetische Strahlführungssysteme sind an sich von Elektronenstrahlröhren in vielfältiger Weise und insbesondere bei Wanderfeldröhren in Form von permanentperiodischen Magnetanordnungen mit entlang der zentralen Achse auftretenden Feldrichtungsumkehrungen, an welchen das Feld auch starke radiale Komponenten aufweist, bekannt. Auf solche bekannten Strahlführungssysteme wird auch zum Zwecke der Offenbarung verwiesen.

Ein magnetisches Feldsystem ist auch vorteilhaft geeignet, die in dem elektrischen Beschleunigungsfeld für die positiven Ionen in entgegengesetzter Richtung beschleunigten langsamen Sekundärelektronen aus den Ionisationsprozessen auf spiralförmige oder ähnliche gekrümmte Bahnen zu zwingen. Hierdurch wird zum einen ein schnelles Auftreffen der Elektronen auf eine der entgegen der Längsachse der Ionisationskammer folgende Elektrode vermieden und die Wahrscheinlichkeit, daß ein Sekundärelektron einen oder mehrere weitere Ionisationsprozesse auslöst, deutlich erhöht, so daß die Ionisation des Treibstoffgases primär durch die Sekundärelektronen erfolgen kann. Zum anderen wird durch den längeren Aufenthalt der Sekundärelektronen die bei der Ionisation entstehende positive Raumladung der langsamen Ionen teilweise kompensiert. Schließlich können die Elektronen durch das Magnetfeld auch weitgehend innerhalb der jeweiligen Potentialstufe gehalten und schließlich auf die entgegen der Längsrichtung nächste Elektrode

geleitet werden, so daß größere Energieverluste durch über weitere Strecken beschleunigte Sekundärelektronen vermieden werden. Die Umlenkung der Sekundärelektronen auf gekrümmte Bahnen um die Richtung des auf die Elektronen beschleunigend wirkenden Feldes ist besonders wirkungsvoll, wenn die Feldrichtungen des elektrischen und magnetischen Feldes senkrecht aufeinanderstehen. Vorteilhafterweise sind daher die elektrischen und magnetischen Felder so ausgebildet, daß sich die Feldlinien im überwiegenden Teil, insbesondere mehr als 90% des Volumens der Ionisationskammer kreuzen. Vorzugsweise liegt der zwischen elektrischer und magnetischer Feldrichtung eingeschlossene Winkel in wenigstens 50% des Volumens der Ionisationskammer zwischen 45° und 135°. Sowohl magnetisches als auch elektrisches Feld zeigen dabei deutlich bis überwiegend Feldkomponenten parallel zur Längsachse und die mittleren Feldrichtungen von elektrischem und magnetischem Feld liegen bevorzugt zusammenfallend auf der Längsachse der Ionisationskammer. Bei einem Magnetfeld mit Feldrichtungswechseln entlang der Längsachse ist hierbei die mittlere Feldrichtung ohne Beachtung der Polarität zu verstehen.

Eine vorteilhafte Anordnung hierfür sieht eine Feldkonfiguration vor, bei welcher Elektroden zur Erzeugung des elektrischen Feldes und Pole des magnetischen Feldes in Richtung der Längsachse abwechselnd aufeinanderfolgen und vorzugsweise Elektroden und/oder Polschuhe an der seitlichen Wand der Ionisationskammer angeordnet sind. Die Felder sind bevorzugt drehsymmetrisch oder rotationssymmetrisch bezüglich der Längsachse und zeigen Maxima und Minima ihrer Feldstärken auf der Längsachse. Im einfachsten einstufigen Aufbau sind zwei Elektroden in Längsrichtung der Ionisationskammer beabstandet und drei die Ionisationskammer umgebende Polschuhe sind gleichfalls voneinander in Längsrichtung beabstandet und mit wechselnder Polarität so angeordnet, daß je zwei Polschuhe in eine der beiden Elektronen zwischen sich einschließen. In Längsrichtung liegen die Elektroden jeweils zumindest annähernd bei Maxima der magnetischen Feldstärke auf der Längsachse und das Minimum der magnetischen Feldstärke auf der Längsachse am Ort der Feldrichtungsumkehr fällt zumindest annähernd mit dem Maximum des elektrischen Feldes in Längsachsenrichtung zusammen.

Besonders vorteilhaft ist eine mehrstufige Anordnung bei welcher das magnetische Feld auf der Längsachse mehrere Feldrichtungsumkehrungen aufweist und die die Ionisationskammer ringförmig umgebenden Polschuhe mit alternierender Polarität in Längsrichtung aufeinanderfolgen und jeweils zwischen zwei Elektroden der elektrischen Elektronenanordnung eingefügt sind. Die mehreren Elektroden bilden Potentialstufen. Das elektrische Feld zeigt aber im Unterschied zum magnetischen Feld keine Feldrichtungsumkehr auf der Längsachse. Das elektrische Potential ändert sich in Längsrichtung der Ionisationskammer von Stufe zu Stufe monoton. Außerhalb der Längsachse verlaufen die Felder der beiden Feldarten gekreuzt zueinander, wobei vorzugsweise in wenigstens 60% des Volumens der von den sich kreuzenden Feldrichtungen eingeschlossene Winkel zwischen 45° und 135° liegt.

Vorteilhafterweise können die elektrischen und magnetischen Felder so aufeinander abgestimmt sein, daß ein im Bereich einer elektrischen Potentialstufe zwischen zwei unmittelbar benachbarten Elektroden durch Ionisation erzeugtes Sekundärelektron durch das Magnetfeld möglichst innerhalb dieser Stufe gehalten und evtl. nach Bewirkung eines oder mehrerer weiterer Ionisationsprozesse auf die entgegen der Längsrichtung nächste Elektrode geleitet wird.

Während die Elektronen aufgrund ihrer geringen Masse

einem starken Magnetfeldeinfluß unterliegen, ist die Bewegung der Ionen im wesentlichen nur durch die elektrischen Felder bestimmt. Die Ionen werden in Richtung des Potentialgefälles beschleunigt und zur Längsachse hin konzentriert, wobei diese Bündelung auch durch die zwischen benachbarten Elektroden entstehenden Feldlinien maßgeblich mitbewirkt wird. Die Ionen können daher aus dem elektrischen Feld im Mittel Energie aus mehreren Potentialstufen aufnehmen, wogegen die Energieverluste durch die von den Elektroden eingefangenen Sekundärelektronen aufgrund der Einschränkung deren Bewegung auf eine oder zwei Potentialstufen gering bleiben, so daß sich ein hoher Wirkungsgrad bei der Umsetzung elektrischer Energie in mechanische Energie ergibt.

Die vorzugsweise ringförmigen Elektroden, insbesondere die zwischen zwei weiteren Elektroden eingeschlossenen Zwischenelektroden einer mehrstufigen Anordnung sind für ein zuverlässiges Einfangen von Sekundärelektronen vorteilhafterweise in Längsrichtung flächig ausgedehnt, wobei die Länge der Zwischenelektroden in Richtung der Längsachse vorzugsweise mindestens 30%, insbesondere mindestens 80% des Abstands zur jeweils nächsten Elektrode beträgt.

Zur Erzielung der beschriebenen Feldeigenschaften mit Beschränkung der Bewegung der Sekundärelektronen und Fokussierung der positiven Ionen durch Feldlinsen beträgt der Durchmesser einer Zwischenelektrode vorzugsweise weniger als 300%, insbesondere weniger als 100% der Elektrodenlänge in Längsachsenrichtung.

Die Erzeugung eines gebündelten Elektronenstrahls in Form eines Zentralstrahls oder eines Hohlstrahls ist aus der Technologie der Kathodenstrahlröhren in vielen Variationen bekannt, so daß auf Details hierzu an dieser Stelle verzichtet und auf Anordnungen aus dem Stand der Technik verwiesen wird. Für die Erfindung wird beispielsweise mittels einer Elektronenoptik vom Pierce-Typ ein von einer Kathode gelöster Elektronenstrom in einen laminaren Strahl gebündelt und in die Ionisationskammer entlang der Längsachse eingeleitet. Der Eintrittsbereich des Elektronenstrahls in die Ionisationskammern ist vorteilhafterweise als Barriere für in der Ionisationskammer erzeugte Ionen ausgebildet, um zu verhindern, daß durch Durchgriff des Kathodenpotentials in die Ionisationskammer Ionen auf die Kathode gelenkt und elektrische Verluste oder gar eine Degradation des Elektronenemissionsvermögens der Kathode verursachen können, oder um einen solchen unerwünschten Ionenstrom zumindest gering zu halten. Als Ionenbarriere kann beispielsweise die erste Elektrode als Ringblende mit gegenüber dem Durchmesser der Ionisationskammer geringem Lochblendendurchmesser ausgeführt sein. Innerhalb der Ionisationskammer wird der Strahl durch das beschriebene Magnetfeld als gebündelter Strahl geführt.

Die Primärelektronen des gebündelten Elektronenstrahls werden in der zur Beschleunigung der Ionen ausgebildeten Potentialdifferenz innerhalb der Beschleunigungsstrecke zwischen der ersten und der letzten Elektrode der vorzugsweise mehrstufigen Elektrodenanordnung, die bevorzugt im wesentlichen mit der Ionisationskammer identisch ist, verzögert. Ohne zusätzliche Energieverluste erreichen die Elektronen das Ende der Verzögerungsstrecke mit einer Restgeschwindigkeit, die sehr viel kleiner sein soll als die Geschwindigkeit am Beginn der Beschleunigungsstrecke (Verzögerungsstrecke für die Elektronen). Das Potential der letzten Elektrode ist hierfür vorteilhafterweise für Elektronen geringfügig niedriger als das Kathodenpotential. Ohne Treibstoffgas in der Ionisationskammer können die Elektronen am Ende der Beschleunigungsstrecke mit geringer Restenergie von der dann als Kollektor wirkenden letzten Elek-

trode aufgefangen werden.

Im Realfall mit Treibstoffgas in der Ionisationskammer geben einige der Primärelektronen auf dem Weg durch die Ionisationskammer Energie durch Wechselwirkung mit dem Treibstoffgas, insbesondere durch Anregung und Ionisation von Treibstoffgas ab und verlieren an Geschwindigkeit. Der hierauf beruhende Geschwindigkeitsverlust ist aber typischerweise sehr klein gegenüber der Anfangsgeschwindigkeit und kann bei der Einstellung des Potentials der letzten Elektrode zur Erzielung eines neutralen Plasmas im austretenden Plasmastrahl berücksichtigt, insbesondere empirisch bestimmt werden.

Die Zuführung des Treibstoffgases erfolgt bevorzugt durch seitliche Wandöffnungen der Ionisationskammer in einem Bereich, der sowohl von der Eintrittsseite des Elektronenstrahls als auch von der Austrittsseite des Plasmastrahls beabstandet ist. Vorzugsweise ist der Zuführungsbe-
reich in einem Abstand zwischen 10% und 40% der Länge der Ionisationskammer in Längsrichtung vom Elektronenstrahleintritt entfernt.

Die vorstehend und in den Ansprüchen angegebenen Merkmale sind sowohl einzeln als auch in Kombinationen vorteilhaft realisierbar.

Die Erfindung ist nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Abbildungen noch eingehend veranschaulicht. Dabei zeigt:

Fig. 1 einen Längsschnitt durch einen mehrstufigen Aufbau

Fig. 2 Feldverläufe für eine mehrstufige Anordnung

Fig. 3 Feldverläufe für eine einstufige Anordnung.

Die in Fig. 1 als Längsschnitt entlang einer Längsachse Z skizzierte Anordnung weist um die Längsachse Z eine Ionisationskammer IK auf, die beispielsweise rotationssymmetrisch um die Längsachse Z aufgebaut ist. Die Längsausdehnung der Ionisationskammer IK in Richtung der Längsachse Z sei wesentlich größer als der Durchmesser DK der Ionisationskammer senkrecht zur Längsachse Z. Die Ionisationskammer IK sei durch eine zylindrische Seitenwand quer zur Längsachse abgegrenzt.

Entlang der Seitenwand sind Magnetpolschuhe PP und Elektroden E1, E2 bis E5 angeordnet, wobei die Polschuhe und die Elektroden zumindest an ihren zur zentralen Längsachse Z hinweisenden Seiten rotationssymmetrisch ausgebildet sind. Die Magnetpolschuhe PP lenken den in von der Ionisationskammer IK radial beabstandet angeordneten Permanentmagneten PM erzeugten magnetischen Fluß in radialer Richtung um, so daß jeder Polschuh PP einen magnetischen Pol bildet, wobei in Längsrichtung unmittelbar aufeinanderfolgende Polschuhe Magnetpole entgegengesetzter Polarität bilden. Das sich in der Ionisationskammer IK zwischen den Polschuhen ausbildende magnetische Feld zeigt daher an der Stelle jedes Polschuhs PP eine Feldrichtungs-
umkehr. Eine solche Magnetfeldanordnung ist an sich als permanentperiodisches Magnetsystem aus der Technologie der Wanderfeldröhren hinreichend bekannt.

Die zwischen den Polschuhen PP angeordneten Elektroden E1 bis E5 liegen auf verschiedenen Potentialen A1, A2 bis A5. Die Elektrodenanordnung wird ergänzt durch eine Kathode K und eine Anode E0. Die Kathode K und die Anode E0 bilden ein Strahlerzeugungssystem zur Erzeugung eines gebündelten Elektronenstrahls EB aus einem laminaren Elektrodenstrom E5. Strahlsysteme zur Erzeugung und Fokussierung eines Elektronenstrahls sind gleichfalls aus dem Stand der Technik in vielfacher Ausführung bekannt. Die Anodenelektrode E0 bildet zusammen mit den die Ionisationskammer seitlich begrenzenden Elektroden E1 bis E5 eine Elektrodenanordnung mit einem für Ionen monotonen Potentialgefälle vom Potential A0 der Anodenelektrode E0

bis zum Potential A5 der Elektrode E5 mit $A0 > A1 > A2 > A3 > A4 > A5$ für positiv geladene Ionen. Für die negativ geladenen Elektronen des Elektronenstrahls EB bildet die Potentialreihe A0 bis A5 ein Bremspotential, welches die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen des Elektronenstrahls EB beim Fortschreiten entlang der Längsachse Z stetig verringert. Für Elektronen gilt somit $A5 > A0$. Das Potential AK der Kathode K für Elektronen wird geringfügig höher gewählt als das Potential A5, so daß die Elektronen des Elektronenstrahls EB nach Durchlaufen der Ionisationskammer bis zur Elektrode E5 noch eine geringe Restgeschwindigkeit besitzen. Der Elektronenstrahl EB wird in der Ionisationskammer durch das zwischen den Polschuhen aufgebaute Magnetfeld HK als gebündelter Strahl geführt.

Der Ionisationskammer wird durch die Seitenwand neutrales Treibstoffgas TG zugeführt. Die Elektronen des Elektronenstrahls EB treten mit dem neutralen Treibstoffgas in Wechselwirkung und bewirken eine teilweise Ionisation des Gases. Die dabei entstehenden positiv geladenen Ionen werden in Richtung des Potentialgefälles von A0 nach A5 beschleunigt und dabei von dem gebündelten Elektronenstrahl EB sowie den durch die aufeinanderfolgenden Elektroden gebildeten Feldlinsen zur Längsachse Z hin gebündelt. Die bei der Ionisation freiwerdenden Sekundärelektronen haben zu Beginn eine sehr geringe Geschwindigkeit in statistisch variierender Richtung. Die Sekundärelektronen werden in dem elektrischen Feld EK zwischen den einzelnen Elektroden beschleunigt, wobei die Richtung der Beschleunigung der Beschleunigungsrichtung der Ionen entgegengerichtet ist. Die beschleunigten Sekundärelektronen werden durch das zugleich in der Ionisationskammer IK vorliegende Magnetfeld HK umgelenkt und auf gekrümmte Bahnen um die Richtung des beschleunigenden elektrischen Feldes gezwungen. Hierdurch wird die Aufenthaltsdauer der Elektronen in einer Stufe zwischen zwei Elektroden erheblich verlängert und die Wahrscheinlichkeit, daß ein solches Sekundärelektron einen weiteren Ionisationsprozeß auslöst, wird stark erhöht. Die Sekundärelektronen werden schließlich von einer der in Richtung der Anode E0 folgenden Elektroden eingefangen. Die längere Verweildauer der Elektronen in der Ionisationskammer zwischen zwei Elektroden bis zum Auftreffen auf eine Elektrode trägt auch dazu bei, daß der schnelle Aufbau einer positiven Raumladung durch die positiv geladenen Ionen und somit eine Abschirmung des die Ionen beschleunigenden Feldes vermieden wird.

Die Ionisation von Treibstoffgas TG sowohl durch die Primärelektronen des Elektronenstrahls EB als auch durch Sekundärelektronen aus vorangegangenen Ionisationsprozessen verteilt sich im wesentlichen über die gesamte Länge der Ionisationskammer. Die entlang des Potentialgefälles zwischen A0 und A5 in Richtung der Längsachse Z beschleunigten und um die Längsachse Z gebündelten Ionen bilden am Ausgang KA der Ionisationskammer zusammen mit den verzögerten Elektronen des gebündelten Elektronenstrahls EB einen weitgehend neutralen Plasmastrahl PB mit nur geringer Strahldivergenz.

Die Anodenelektrode E0 ist zugleich als Elektronenbarriere ausgebildet und weist die Form einer Blendenlektrode mit einer gegenüber dem Durchmesser DK der Ionisationskammer kleinen Durchmesser der Blendenöffnung auf. In der Fig. 1 sind als Beispielswerte für die Potentialschritte die auf die letzte Elektrode E5 bezogenen Spannungen der Elektroden E0 bis E4 eingetragen. Die Spannung der Kathode K ist gegenüber der letzten Elektrode E5 leicht negativ. Die Pole der Magnetanordnung sind in gebräuchlicher Weise mit S und N unterschieden.

Die Fig. 2 zeigt qualitativ den Feldverlauf und die Elektronenladungsverteilung entlang der Längsachse Z für einen

Ausschnitt aus der Struktur nach Fig. 1. In der Darstellung der Fig. 2 sind neben den Feldverläufen und Ladungsverteilungen der Elektronen auch noch die Elektroden E0, E1, ... sowie die Polschuhe PP andeutungsweise an ihren Positionen entlang der Z-Achse eingezeichnet. Der Primärelektronenstrahl EB ist symmetrisch zu beiden Seiten der Längsachse Z eingetragen, wogegen die Häufungen EC der Sekundärelektronen der Übersichtlichkeit halber lediglich auf einer Seite der Längsachse Z eingetragen sind. Mit Ez und Hz sind die Feldstärken auf der Längsachse bzw. deren unmittelbarer Umgebung eingetragen. Die Längsachse Z bildet die Abszisse der Darstellung und die Ordinate gibt die Feldstärke Ez bzw. Hz qualitativ an. Das elektrische Feld Ez auf der Längsachse ist an den Positionen der Elektroden E0, W1, ... minimal und in der Mitte zwischen den Elektroden maximal. Es findet dabei keine Richtungsumkehr des Feldes statt, so daß die elektrische Feldstärke in der Darstellung das Vorzeichen nicht ändert. Die Magnetfeldstärke in Z-Richtung auf der Längsachse zeigt Minima an den Orten der Polschuhe PP und Maxima zwischen zwei benachbarten Polschuhen. Im Unterschied zum elektrischen Feld tritt für das magnetische Feld an den einzelnen Polschuhen jeweils eine Feldrichtungsumkehr auf, welche sich in der Skizze als ein Durchgang durch die als Nulllinie gedachte Längsachse Z darstellt und als Vorzeichenwechsel behandelt werden kann. Die bei Ionisationsprozessen entstehenden Sekundärelektronen werden durch das elektrische Feld in der Ionisationskammer beschleunigt und durch das magnetische Feld auf gekrümmte Bahnen gezwungen. Es tritt eine Häufung von Elektronen, d. h. eine erhöhte Konzentration von Elektronen in ringförmigen Bereichen EC um die Längsachse Z auf, welche bezüglich der Längsrichtung ungefähr bei den Minima des elektrischen bzw. Maxima des magnetischen Feldes liegen.

Die Fig. 3 zeigt in vergleichbarer Darstellung wie in Fig. 2 Feldverläufe und Elektronenverteilungen für eine einstufige mit zwei Elektroden E1, E2 auf Potentialen A0 bzw. A1 sowie mit einer Magnetanordnung mit drei Polschuhen PP1, PP2 und PP3, von denen jeweils zwei je eine der beiden Elektroden E1 bzw. E2 einschließen. Die Feldanordnung einer solchen Einzelstufe zeigt ähnlich zu der in Fig. 2 skizzierten Verteilung Minima der elektrischen Feldstärke auf der Achse an den Orten der Elektroden E1, E2 sowie ein Maximum der elektrischen Feldstärke Ez auf der Achse zwischen den beiden Elektroden. Die Magnetfeldstärke Hz auf der Längsachse Z erreicht ein Minimum im Bereich des mittleren Polschuhs PP2, wo auch eine Feldrichtungsumkehr stattfindet. Maxima der magnetischen Feldstärke liegen wieder im Bereich der Elektroden E1 und E2, wo die elektrische Feldstärke Ez auf der Achse Minima aufweist. Die Wirkungsweise bei der Entstehung von ringförmigen Elektronenwolken EC um die Längsachse Z entspricht den Ausführungen zu Fig. 2.

Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern im Rahmen fachmännischen Können in mancherlei Weise abwandelbar. Insbesondere sind hinsichtlich der Abmessungen der Ionisationskammer, der Größenverhältnisse von Elektroden, Elektrodenabständen, Elektrodendurchmesser eine Vielzahl von auf den Einzelfall abgestimmten Variationen denkbar. Die Abstände der Elektroden und/oder der Polschuhe sowie die Länge der Elektroden in Richtung der Längsachse ist bei mehrstufigen Anordnungen nicht zwangsweise für alle Stufen konstant. Das Potentialgefälle ist zwischen den ersten und der letzten Elektrode nicht notwendigerweise linear, sondern kann im Einzelfall auch einen nichtlinearen Verlauf annehmen. Die Plasmabeschleuniger-Anordnung ist nicht auf den beschriebenen bevorzugten Anwendungsfall eines Ionenantriebswerks

für einen Raumflugkörper beschränkt, sondern auch zur berührungslosen Materialbearbeitung unter Einsatz hoher Leistungsdichten wie beispielsweise beim Schweißen, Löten, Schneiden oder dgl. auch von hochschmelzenden Metallen vorteilhaft einsetzbar.

Patentansprüche

1. Plasmabeschleuniger-Anordnung mit einer Ionisationskammer um eine Längsachse, mit einer Elektrodenanordnung zur Erzeugung eines elektrischen Potentialgefälles für positiv geladene Treibstoffionen über eine Beschleunigungsstrecke entlang der Längsachse, und mit Mitteln zur Einleitung eines gebündelten Elektronenstrahls entlang der Längsachse in die Ionisationskammer.
2. Anordnung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein magnetisches Strahlführungssystem zur Führung des Elektronenstrahls entlang der Längsachse.
3. Anordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Strahlführungssystem eine Permanentmagnetanordnung enthält.
4. Anordnung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das magnetische Strahlführungssystem entlang der Längsachse eine oder mehrere Richtungsumkehrungen aufweist.
5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrodenanordnung über die Beschleunigungsstrecke eine oder mehrere Zwischenelektroden entsprechend einer Unterteilung des Potentialgefälles in mehrere Stufen aufweist.
6. Anordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischenelektroden an der seitlichen Begrenzung der Ionisationskammer angeordnet sind.
7. Anordnung nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Länge der Zwischenelektroden in Richtung der Längsachse mindestens 30%, vorzugsweise mindestens 80% des Abstands zur jeweils nächsten Elektrode beträgt.
8. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchmesser einer Zwischenelektrode weniger als 300%, insbesondere weniger als 100% der Elektrodenlänge in Richtung der Längsachse beträgt.
9. Anordnung nach einem der Ansprüche 2 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß Pole des magnetischen Strahlführungssystems und Elektroden der Elektrodenanordnung in Richtung der Längsachse abwechselnd aufeinanderfolgen.
10. Anordnung nach einem der Ansprüche 2 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß elektrische und magnetische Felder in einem weit überwiegenden Teil, insbesondere mehr als 90% des Volumens der Ionisationskammer gekreuzt verlaufen.
11. Anordnung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß in mehr als 60% des Volumens der Ionisationskammer der zwischen elektrischer und magnetischer Feldrichtung eingeschlossene Winkel zwischen 45° und 135° liegt.
12. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Betrag des elektrischen Potentialgefälles geringfügig, insbesondere um weniger als 10% niedriger ist als die mittlere kinetische Energie der Elektronen des Elektronenstrahls am Eintritt in die auf die Elektronen verzögernd wirkende Beschleunigungsstrecke.
13. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß in dem am Ende der Be-

schleunigungsstrecke austretenden Plasmastrahl die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen annähernd gleich der mittleren Geschwindigkeit der positiv geladenen Ionen ist.

14. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß sich die mittleren Geschwindigkeiten von Elektronen und Ionen um maximal den Faktor 10 unterscheiden. 5

15. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Beschleunigungsstrecke zur Seite des Eintritts des Elektronenstrahls durch eine Ionenbarriere abgeschlossen ist. 10

16. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß eine Elektrode am Beginn der Beschleunigungsstrecke als eine Blendenelektrode mit einer zentralen Öffnung für den Elektronenstrahl, deren Durchmesser wesentlich kleiner ist als der Durchmesser der Ionisationskammer, ausgeführt ist. 15

17. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß neutraler gasförmiger Treibstoff der Ionisationskammer seitlich zugeführt ist. 20

18. Anordnung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Treibstoffzufuhr in einem Bereich zwischen 10% und 40% des Längenverlaufs der Ionisationskammer von der Seite des Eintritts des Elektronenstrahls beabstandet erfolgt. 25

19. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Länge der Ionisationskammer wesentlich größer als deren Durchmesser, insbesondere größer als das 3-fache des Durchmessers ist. 30

20. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Beschleunigungsstrecke und die Ionisationskammer im wesentlichen identisch sind. 35

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

40

45

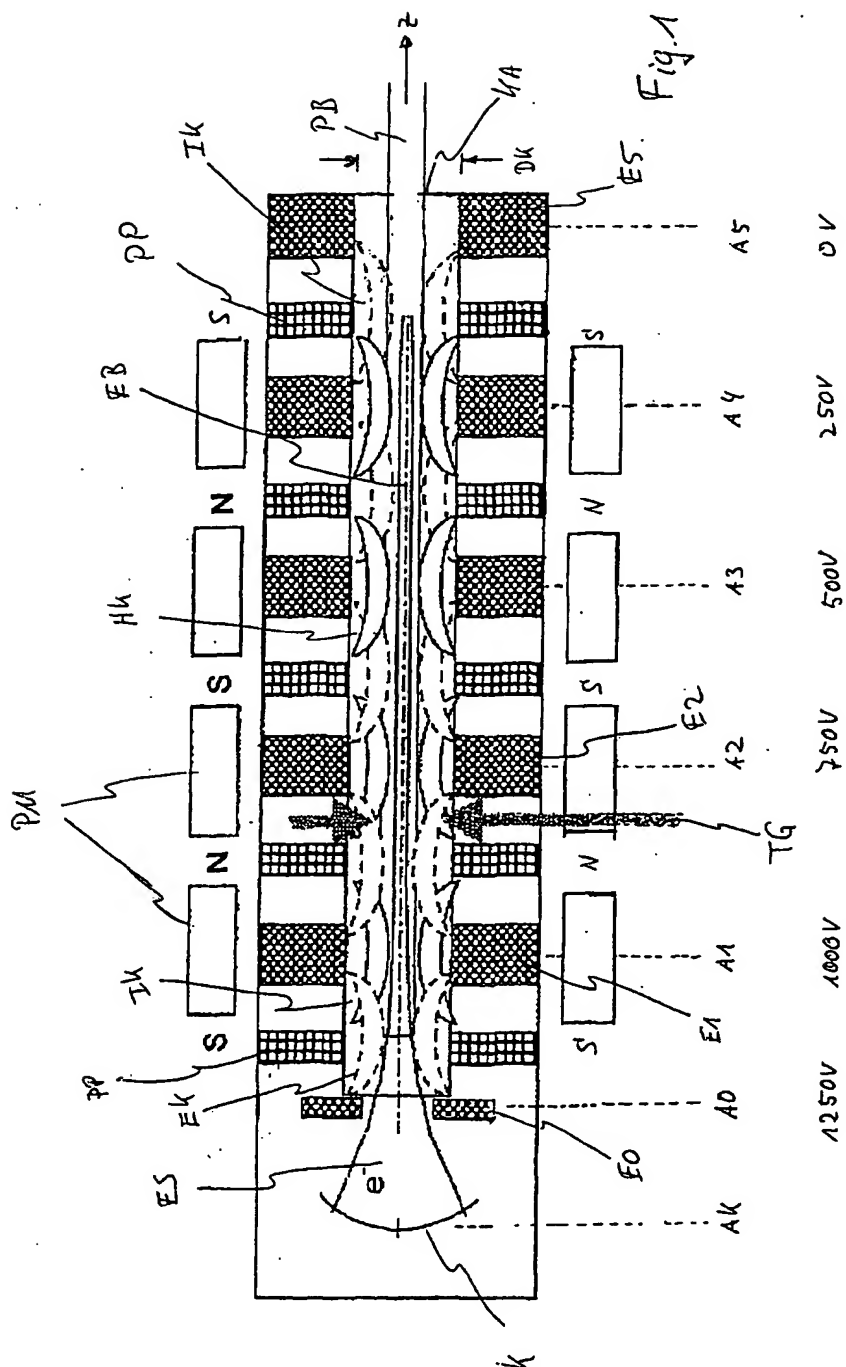
50

55

60

65

- Leerseite -



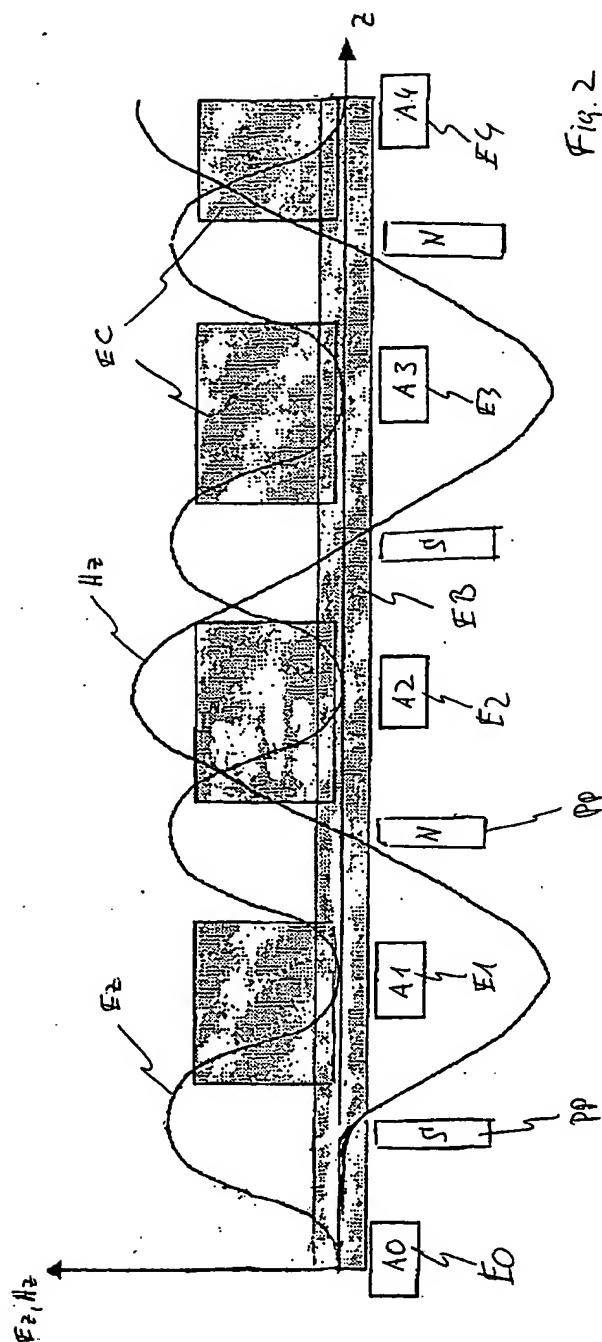


Fig. 2

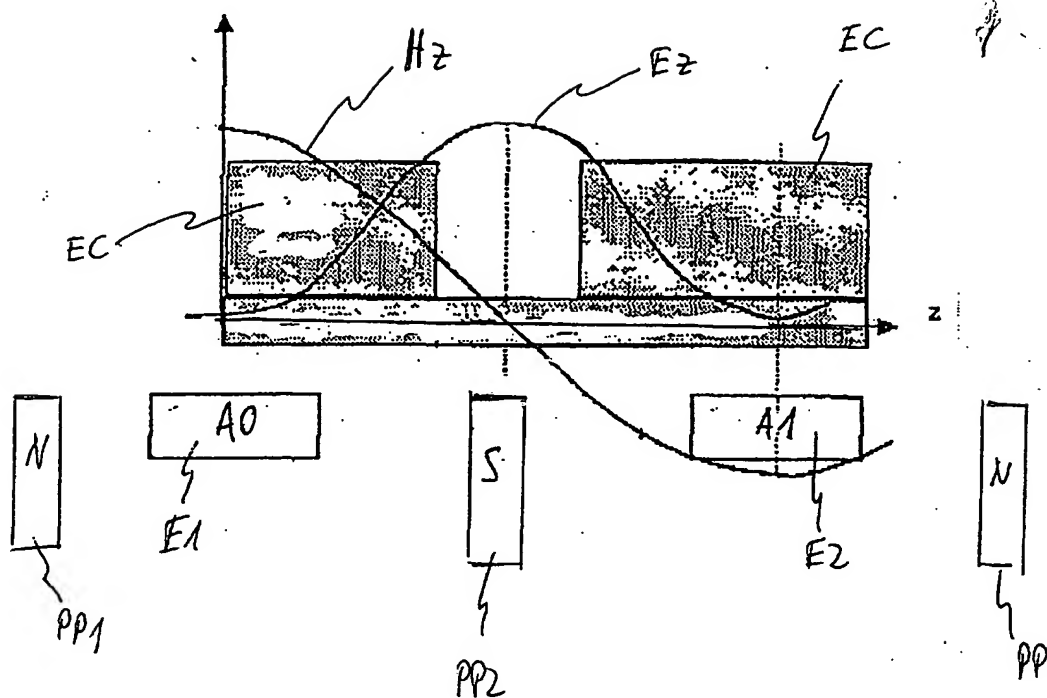


Fig. 3

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.